

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Подзолко Михаила Владимировича на тему: «Моделирование радиационных условий в гелиосфере для межпланетной миссии к системе Юпитера» по специальности 01.03.03 «Физика Солнца»

Настоящая работа посвящена моделированию радиационных условий космической исследовательской миссии, в ходе которой автоматическая межпланетная станция должна быть впервые доставлена на орбиту и поверхность одного из больших спутников Юпитера (Европа или Ганимед). Целью работы являлось моделирование радиационных условий для российского проекта миссии «Лаплас» к системе Юпитера, а сам диссертант является членом Рабочей Группы по разработке проекта. Оппонент не сомневается ни в актуальности избранной темы, ни в степени обоснованности научных положений, выносимых на защиту, ни в достоверности выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Их достоверность и новизна также не вызывает сомнений, а сама работа соответствует критериям, установленным для кандидатской диссертации.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, изложены цели и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показана новизна и научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе излагается методология исследования и приводится обзор имеющихся моделей, описывающих пространственное, временное и энергетическое распределения потоков энергичных заряженных частиц гелиосферы, которые использовались в данной работе для расчётов радиационных условий на всех этапах межпланетной миссии к Юпитеру. При этом учитываются особенности того или иного вида гелиосферных частиц. Например, флюенсы тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) в

используемой модели СКЛ (НИИЯФ МГУ) задаются через коэффициенты их распространенности в СКЛ относительно протонов. В качестве «эталонного» значения толщины защиты в работе используется значение 2.2 г/см^2 ($\approx 8 \text{ мм Al}$), эквивалентное толщине защиты первого искусственного спутника Юпитера «Galileo». Здесь мне хотелось бы отметить, прежде всего, эрудицию диссертанта в области моделирования радиационных условий на различных этапах миссии «Лаплас», глубокое знание проблемы и владение материалом.

Во второй главе приводятся результаты моделирования радиационных условий на околоземном и межпланетном этапах полёта. Показано, что за время пролётов вблизи Земли КА не получит существенную дозу радиации по сравнению с другими этапами миссии. Тем не менее, с учётом возможных вариаций потоков электронов внешнего пояса, для элементов КА за защитой $\leq 1-1.5 \text{ г/см}^2$ будет существовать опасность возникновения явлений внутренней электризации.

Для межпланетного этапа миссии расчёты выполнены в двух вариантах траекторий полёта. Расчетные значения доз радиации за защитами толщиной 1 и 2.2 г/см^2 для второго, более радиационно-опасного, варианта составляют ≈ 5 и 1.5 крад, соответственно. Как следствие, дозы радиации, полученные на межпланетном этапе полёта, будут значительно ниже, по сравнению с дозами, которые КА получит в околопланетной области Юпитера (это показано в главах 3 и 4).

В третьей главе приводятся результаты моделирования радиационных условий на орбитах спутников Юпитера Европа и Ганимед. Это - самая большая и самая важная по содержанию глава. В ней приводятся результаты моделирования радиационной обстановки вблизи Юпитера, непосредственно в его магнитосфере, - там, где вращаются его спутники Европа и Ганимед. Здесь, в частности, показано, что миссия к Европе сопряжена с чрезвычайно высокой радиационной опасностью. В частности, доза радиации в области орбиты Европы за защитой 2.2 г/см^2 , за два месяца достигает 1 Мрад. Кроме того, флюенс электронов с энергией $>5 \text{ МэВ}$, которые проникают за защиту

2.2 г/см², в области орбиты Европы составляет $\approx 10^{12}$ частиц/(см²·сутки), что влечёт очень высокий риск возникновения явлений внутренней электризации на борту КА. Потоки электронов и дозы радиации в области орбиты Ганимеда меньше на два порядка величины, чем в области орбиты Европы. Поэтому миссия к Ганимеду может быть осуществлена со значительно меньшими радиационными рисками.

Что касается посадки на поверхность Европы, то оптимальными местами для этого являются её передняя сторона относительно направления её движения по орбите, околополярные области и область в центре задней полусферы. В этих областях, по результатам моделирования М.В. Подзолко, КА получит дозу радиации за защитой 2.2 г/см² всего $\leq 10\%$ от величины дозы без учёта экранирующего влияния Европы, то есть < 100 крад за 2 месяца.

Уместно затронуть здесь один вопрос о приоритете. В публикации (Paranicas et al., 2007) были описаны похожие расчёты, но с учётом только широтного и долготного дрейфа электронов относительно Европы. В данной же работе моделирование *впервые* выполнено с учётом *нескольких* физических факторов (публикация А3: Podzolko et al., 2011).

В четвёртой главе, с учётом результатов главы третьей, проводится анализ радиационных условий на конкретных траекториях полёта в системе Юпитера и производится выбор оптимальных гравитационных манёвров. В частности, для миссии к Европе найден оригинальный вариант траектории 1-го витка: пролёт на радиальном расстоянии < 1.5 радиусов Юпитера с наклоном $\approx 40^\circ$, доза радиации за время которого за защитой 2.2 г/см² составит ≈ 20 крад. В перицентре такой траектории КА пролетает «ниже» радиационных поясов Юпитера, а до и после него пересекает пояса на удалении от экватора, где потоки частиц существенно ниже, чем на экваторе.

Для миссии к Ганимеду для снижения общего уровня радиационной нагрузки перицентр 1-го сближения с Юпитером должен находиться за пределами орбиты Европы. Разработан оригинальный вариант траектории

гравитационных манёвров с низкой радиационной нагрузкой (доза <10 крад за защитой 2.2 г/см^2) и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты. Для миссии к Ганимеду, на орбите и поверхности которого за 2 месяца КА получит дозу радиации <10 крад, предложено, в частности, осуществлять 1-й пролёт вблизи Юпитера на радиальном расстоянии $>10 R_J$. Доза радиации на такой траектории за защитой 2.2 г/см^2 не превысит нескольких крад.

В **Заключении** суммируются итоги работы. Основной из них таков: при помощи модельных расчётов на основе имеющихся экспериментальных и теоретических представлений о потоках энергичных заряженных частиц в гелиосфере получены оценки радиационных условий для каждого этапа миссии к спутникам Юпитера Европа и Ганимед.

В качестве направлений дальнейших исследований по теме настоящей работы диссертант указывает следующие: 1) совершенствование методов моделирования пространственного распределения потоков энергичных заряженных частиц вблизи спутников Юпитера, в том числе с учётом возмущений магнитного поля Юпитера в их окрестности; 2) дальнейший поиск путей минимизации радиационных рисков при продолжении работы над российским проектом «Лаплас» миссии к спутникам Юпитера.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует отметить, что автор не только владеет основной информацией по проблеме, но и реализует свой собственный подход: учёт **нескольких** физических факторов, которые определяют величину дозы на различных этапах миссии. Работа написана хорошим языком, очень аккуратно оформлена, достаточно иллюстрирована рисунками и содержит только ссылки, необходимые для понимания сути дела. Вместе с тем, можно высказать несколько критических замечаний.

1. Хотя в тексте имеется сводная таблица с перечнем КА, изучавших окрестности Юпитера на пролётных или околопланетных траекториях, из работы не вполне ясно, что нового внесли полученные данные в

- расчёты миссии к Юпитеру (в частности, наблюдения на двух КА «Галилео» и «Юнона» с околопланетными орбитами)?
2. Автор использовал модель СКЛ, разработанную ранее в НИИЯФ МГУ (1999), но не отметил, что в 2014-2018 годах она была существенно дополнена - построена новая функция распределения вероятности экстремально больших протонных событий. Это замечание можно считать скорее пожеланием автору на будущее.
 3. Что касается положений, выносимых на защиту, то п.4 и п.5 звучат нормально, тогда как остальные стилистически неточны (нуждаются в редактировании). Нужно не перечисление сделанного, а следствия, вытекающие из результатов моделирования.
 4. На рисунках, взятых из других работ, не всегда приводятся должные ссылки.
 5. Следует также отметить неизбежные опечатки и стилистические погрешности. Например, на с.24 неточно дана ссылка (надо Raukunen et al. 2018); на с.27 дважды неверно написана фамилия исследователя (надо Badhwar); имеются опечатки (повтор одинаковых слов и т.п.) на с. 64, 75, 84, 92 («могут иметься»). На с.36 первый абзац занимает 7 строк и выглядит тяжеловесно (много лишних слов).
 6. Для обозначения радиационно-опасных излучений (ГКЛ, СКЛ и др.) автор использует выражение «гелиосферные частицы». Это вполне приемлемо на полуинтуитивном уровне, но требует уточнения и/или пояснений. Может быть, лучше звучало бы «энергичные частицы гелиосферы (или в гелиосфере)», в отличие, например, от частиц солнечного ветра?

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, проведенного М.В. Подзолко. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 01.03.03 «Физика Солнца» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям №№5,6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Подзолко М.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 «Физика Солнца».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Отдела физики Солнца и солнечно-земных связей ИЗМИРАН



Мирошниченко Леонтий Иванович

10 декабря 2018 г.

Контактные данные: тел.: 8(495)8510282, e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.03, гелиофизика и физика Солнечной системы

Адрес места работы: 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, Тел: 8(495)8510282, e-mail:

Подпись Л.И. Мирошниченко удостоверяю:

Учёный секретарь ИЗМИРАН кандидат ф.-м. н. А.И. Рез.

